

DC-6 GHz宽带同轴电磁辐照实验装置的设计研究

王诗棋 房少军 陈鹏*

(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

摘要: 由于传统TEM小室的频带宽度不能满足日益增长的宽频带需求, 该文采用同轴结构设计了一个DC-6 GHz的宽带电磁辐照装置。该装置基于传输线理论和阻抗匹配原理, 采用锥形过渡与圆同轴连接的结构, 在端口处选用N型连接器, 与腔体的连接实现了良好的阻抗匹配。利用CST仿真软件进行建模优化, 最后对仿真结构进行加工与调试, 仿真结果表明, 该同轴电磁辐照装置在DC-6 GHz频率范围内S11均在-10 dB以下, 由于加工的误差测试结果在个别频点稍有偏差, 但趋势和仿真结果具有较好的一致性, 吻合较好, 证明该辐照装置具有良好的传输性能。该文设计的同轴腔在电磁辐照系统中具有很好的应用价值。

关键词: 电磁辐照装置; DC-6 GHz宽带; 阻抗匹配

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1092-06

DOI: 10.11999/JEIT180593

Design and Research of DC-6 GHz Broadband Electromagnetic Radiation Experimental Device

WANG Shiqi FANG Shaojun CHEN Peng

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: As the bandwidth of the traditional TEM cell can not satisfy the growing demand for broadband, a broadband electromagnetic radiation device working from DC to 6 GHz is designed based on the coaxial structure. According to circuit principle and impedance matching of the transmission line, the device adopts the taper transition structure between the N connector and circular coaxial connected, which achieves the advantages of good impedance matching. The device is simulated by the CST software, and has been fabricated and measured. The simulated results show that S11 is better than -10 dB in the frequency range of DC-6 GHz. Due to the machining error, test results are slightly biased at individual frequencies, which have good consistency with the simulated results and demonstrate the desirable transmission performance of the radiation device. The design has great application value in electromagnetic radiation system.

Key words: Electromagnetic radiation device; DC-6 GHz broadband; Impedance matching

1 引言

电磁辐射对人体的影响有多大, 需要对电磁生物效应进行深入研究。近年来, 随着移动通信的发展, 频率范围逐渐加宽, 不同频率的电磁波对人体的影响引起了极大关注。电磁辐照系统是用来研究电磁辐射对细胞影响的实验装置, 已成为生命科学领域的重要新课题^[1-7]。国内外有运用硬件软件相结合的方式组成电磁辐照装置^[8-11], DC-3 GHz宽频电磁辐射腔^[12], TEM小室^[13]、GTEM小室、矩形波导辐照系统、贴片天线等结构^[14-16]。尽管专家学者已研究超过半个世纪, 仍有很多问题需要解决^[17,18], 其中包括电磁环境模拟程度不高并不能完

全模拟空间的电磁环境, 频带范围较窄不能满足越来越宽的频带需求等。为了实现覆盖较宽的通信频率范围, 研究DC-6 GHz宽频带范围内电磁辐照对细胞的影响, 实现宽带同轴电磁辐照装置的设计是非常有意义的。传统的最高频率为3 GHz的TEM小室设计, 其外形尺寸为338 mm×152 mm×60 mm^[14], TEM小室的总长约为最高工作频率所对应的波长^[8], 当频率范围为DC-6 GHz时尺寸会缩小一半, 通常情况下细胞培养皿直径为35 mm, 高度10 mm, 不能放入其中进行实验; 本文给出的装置在最高频率为6 GHz的情况下, 结构尺寸为354 mm×120 mm×52 mm, 该结构在提高了频带宽度的同时保证了尺寸的大小, 可以将细胞培养皿放入。

本文提出的这种圆同轴与锥形过渡相连接的结构, 以传输线理论、阻抗匹配为基础, 用CST仿真

软件设计一个DC-6 GHz宽带同轴电磁辐照装置, 选择合适的N型射频连接器, 通过外加宽频信号源的激励, 提供电磁场均匀度较好的电磁辐照空间, 同时在所需的宽频带范围内具有较小的反射系数。

2 基本原理

同轴线是一种双导体导行系统, 由内外两个共轴的圆柱导体组成, 它主要传输TEM波, 当存在不连续性或高频工作时激励起TE模或TM模。其特性阻抗为 $Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(b/a)$ 。电场在理想同轴线内垂直于内导体均匀分布, 而实际中不可能呈完全均匀分布, 造成其不均匀性的原因有: 结构的原因, 如内导体边缘效应的影响; 高频下会出现高次模的影响等。在微波网络中同轴传输线之间的连接或不同传输线之间的转换会不可避免地造成不连续性。对于不连续性, 可在小区域内形成一个等效

2端口网络电路来表示, 如T型结构电路、II型结构电路等, 使该等效2端口网络的特性阻抗和传输线的特性阻抗相匹配。

阻抗不匹配会产生反射现象, 从而形成驻波和谐振。为了实现匹配, 该装置沿传输方向的特性阻抗理论上应保持 50Ω 。阻抗匹配的难点主要是由电磁辐照装置的不规则形结构导致。为保证信号尽可能地传播, 剩余反射波较小, 实现阻抗匹配可使装置的性能达到最优, 通常情况下, 是在信号源与传输线之间接入匹配装置^[19-21]。在保证同轴线特性阻抗相同的情况下, 截面尺寸不同的同轴线通常采用锥形过渡或错位过渡结构进行连接, 来补偿尺寸突变产生的不连续性, 实现阻抗匹配, 如图1所示。锥形过渡中锥顶的微小位移会引起较大的反射, 因此锥形斜率必须保持较高的精度, 来保证较低的反射, 通常情况下选用角度在 12° 和 16° 之间。

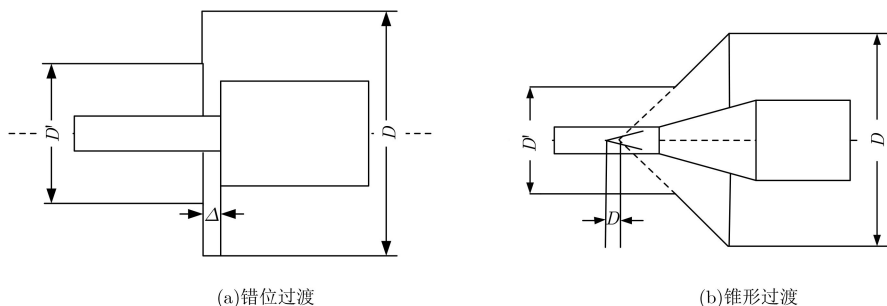


图1 结构图

3 同轴电磁辐照装置设计

本文设计的同轴电磁辐照装置可用频率范围为DC-6 GHz, 回波损耗低于 -10 dB 。

3.1 结构

通过上述的理论分析, 可以得到本设计的结构如图2所示。同轴电磁辐照装置的一侧与 50Ω 的N型射频连接器的一端相连接, 射频连接器的N型接口端与信号源相连; 另一侧通过连接N型射频连接器最终与 50Ω 的匹配负载相连, 采用长度为 L_1 的锥形过渡结构将辐照装置圆形同轴部分和射频连接器相连。用支撑介质子将同轴的内外导体进行强度支撑和位置固定, 保证此电磁辐照实验装置的同轴度。

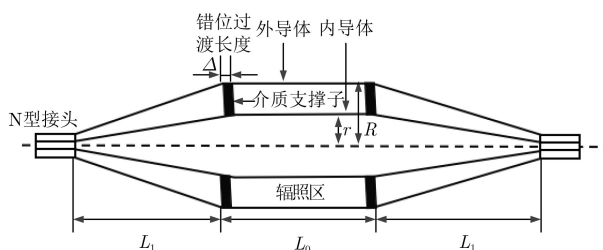


图2 DC-6 GHz同轴电磁辐照装置结构图

为了有效地抑制高次模, 保证在实验装置辐照区域只传输TEM主模, 要使可用的最大频率 f_{\max} 尽可能的低于第1高次模 H_{11} 的截止频率 f_c , 最终选取 $f_{\max} = f_c/1.1$, 而且要保持同轴尺寸的特性阻抗保持恒定为 50Ω ; 所选取的N型射频连接器为NK-7连接器L-16母头, 由于它的尺寸和辐照区域尺寸相差很大, 故选用锥形过渡和错位过渡相结合的方式将二者连接起来, 减小了因尺寸突变产生的同轴不连续性以及阻抗突变问题, 最终外导体内锥形的斜率为 12.28° ; 在实验装置的内外导体之间加入介质支撑子来对其进行固定和支撑, 介质支撑子材料的介电常数越小, 阻抗突变越小, 因此选用介电常数最小的聚四氟乙烯($\epsilon_r = 2.03$)作为材料, 为了补偿介质支撑子引入所产生的不连续性, 采用在介质支撑子表面挖去一部分形成圆形凹槽的共面补偿方法, 用形成的小电感来补偿电容。根据前述分析结果, 设计的同轴装置尺寸如表1所示。

由于该装置的复杂性, 对一些影响辐照装置的性能的结构参数, 如: 锥形过渡的长度 $H/3$ 、错位过渡 Δ 的错开距离等进行了参数扫描, 如图3和图4

表 1 电磁辐照实验装置结构尺寸(mm)

L_1	L_0	R	r	Δ
117.31	119.40	25.60	11.10	2.04

所示。从图3仿真结果可以看出，锥形过渡的长度与回波损耗 S_{11} 有密切关系，对锥形过渡的长度从86.44 mm到96.44 mm进行了参数扫描，结果显示锥形过渡长度 H_3 为91.44 mm时性能最好，当长度小于最优值时回波损耗在低频部分略高，长度大于

最优值时回波损耗在高频部分会大于-5 dB，影响同轴辐照装置的传输性能。从图4仿真结果可以看出，错位距离对辐照装置的性能影响较大，恰当的错开距离可以用来解决阶梯电容的补偿问题，对错开距离从0.54 mm到3.54 mm进行了参数扫描，结果显示错开距离为2.04 mm时性能最好，当距离小于最优值时回波损耗在低频部分略高会大于-15 dB，距离大于最优值时回波损耗在高频部分波动较大，影响同轴辐照装置的传输稳定性。

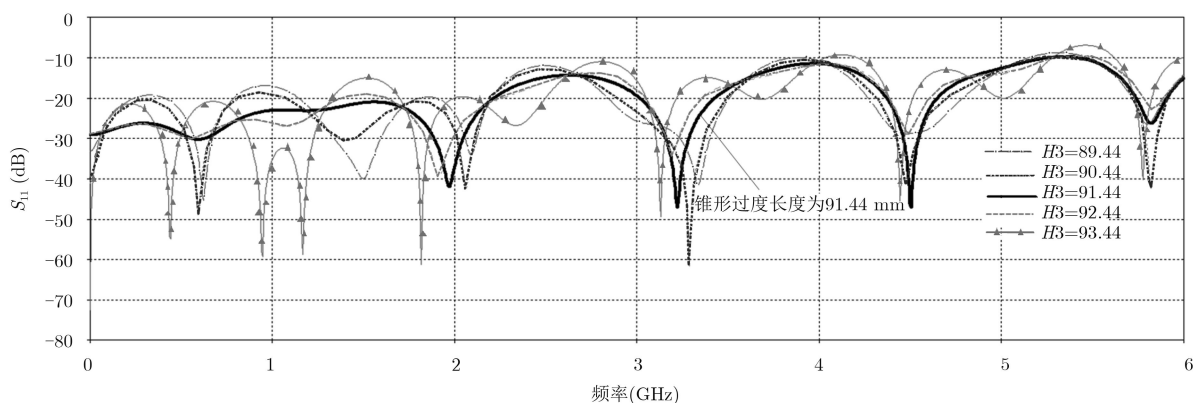


图 3 锥形过渡长度对回波损耗影响的仿真结果

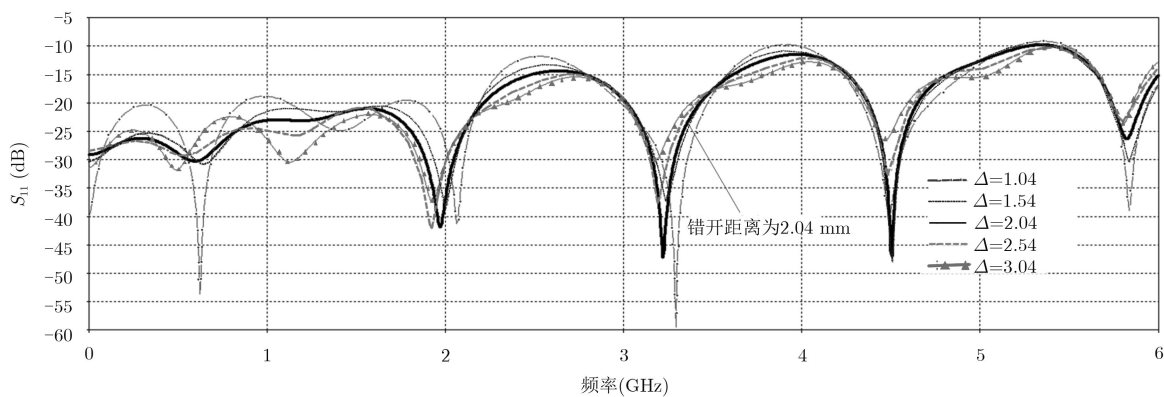


图 4 错位过渡长度对回波损耗影响的仿真结果

3.2 仿真与加工测试

运用CST仿真软件对所设计的同轴电磁辐照装置进行仿真实验，使用厚度为9 mm的聚四氟乙烯作为介质支撑材料，仿真模型如图5所示。根据CST仿真设计得到的尺寸，加工制作实物，测试使用矢

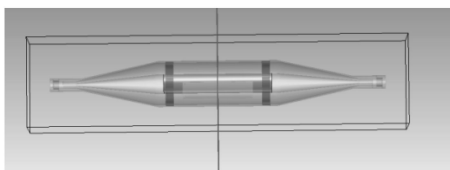


图 5 电磁辐照实验装置仿真模型

量网络分析仪AV3629b，实测场景如图6所示。

通过仿真以及测试得到回波损耗和传输系数结果曲线如图7所示，由图可知，在DC-6 GHz的频率范围内，仿真结果的回波损耗均在-10 dB以下，传输系数与0 dB接近，传输效果较好，由于加工精度的误差，测试结果在个别频点稍有偏差，但趋势相同。而通过图8(a)的 $z=0$ mm处和图8(b)的 $z=59$ mm处的辐射电场图可以看出实验装置内部的电磁场具有一定的均匀性。

4 结论

电磁辐射对于我们人类的影响已经不可忽视，



图6 实验测试场景图

通过对细胞进行电磁辐照实验来研究其生物效应尤为重要。本文基于传输线理论、不连续性及阻抗匹配原理提出了一种新型的宽带同轴电磁辐照装置用于细胞实验,该装置由圆同轴和锥形过渡相连接组合而成,其频带范围较宽,尺寸较大。仿真分析表明该装置的回波损耗 S_{11} 在-10 dB以下,传输系数 S_{21} 与0 dB接近,具有较好的传输性能,将该装置进行加工和测试,测试结果与仿真结果吻合较好,验证了该装置的可行性。本文中设计的装置频带范围宽,与传统TEM小室相比,提高了上限频率,增大了尺寸,在电磁辐照系统中有很好的应用价值。

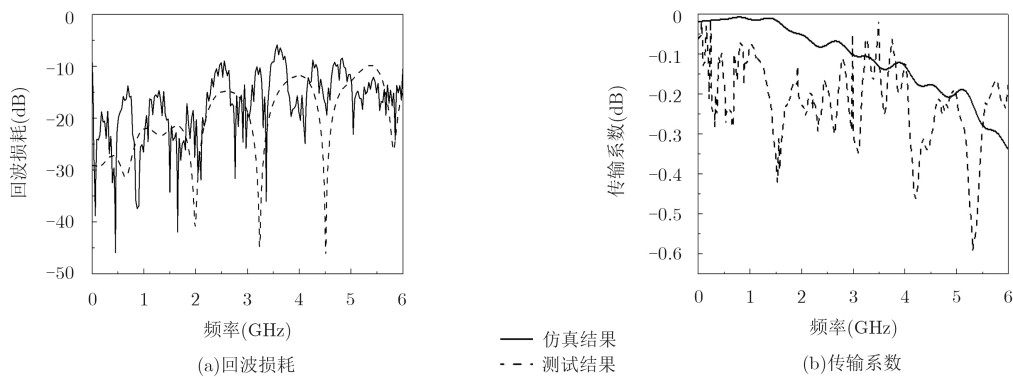


图7 电磁辐照装置仿真与测试结果

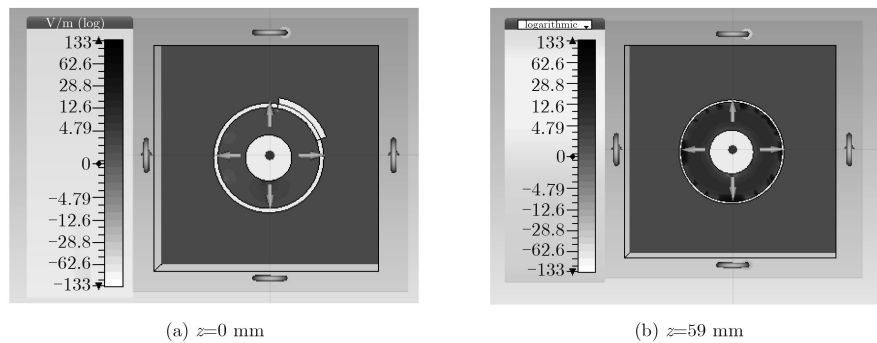


图8 辐射电磁场图

参考文献

[1] 刁岗, 候建强, 王海彬, 等. 射频电磁波生物学效应实验系统的研制[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(4): 92-95. doi: 10.3969/j.issn.1001-411X.2003.04.025.

XI Gang, HOU Jianqiang, WANG Haibin, et al. Development of a system for studying the biological effect of radio frequency electromagnetic field[J]. *Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition*, 2003, 24(4): 92-95. doi: 10.3969/j.issn.1001-411X.2003.04.025.

[2] 李海娟, 胡向军, 王丽峰, 等. 生物电磁学研究的新进展——从生物电磁学会第34届年会谈起[J]. 生物物理学报, 2013, 29(4): 310-318.

LI Haijuan, HU Xiangjun, WANG Lifeng, et al. Recent advances in the study of biological electromagnetics[J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2013, 29(4): 310-318.

[3] 潘越越, 吴广芬, 李旭, 等. 大学生手机电磁辐射分析与监测[J]. 大学物理, 2017, 36(3): 63-65.

PAN Yueyue, WU Guangfen, LI Xu, et al. Analysis and check of cellphone's electromagnetic radiation of undergraduates[J]. *College Physics*, 2017, 36(3): 63-65.

[4] 杨源. 电磁能量无线近场传输的研究[D]. [硕士学位论文], 电子科

- 技大学, 2017.
- YANG Yuan. Research of wireless near-field electromagnetic power transfer[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [5] 刘紫薇, 任伯绪, 江献旺. 生物标志物在电离辐射中的应用与研究进展[J]. 长江大学学报: 自科版, 2018, 15(8): 77-82.
- LIU Ziwei, REN Boxu, and JIANG Xianwang. Application and research progress of biomarkers in ionizing radiation[J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2018, 15(8): 77-82.
- [6] 孙立君, 高艳, 郭颖, 等. 高频电磁辐射对小鼠情绪-认知行为的损伤作用[J]. 中国比较医学杂志, 2018, 28(3): 15-20. doi: [10.3969/j.issn.1671-7856.2018.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7856.2018.03.003).
- SUN Lijun, GAO Yan, GUO Ying, *et al.* Behavioral tests of mood-cognitive impairment of mice exposed to high-frequency electromagnetic radiation[J]. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2018, 28(3): 15-20. doi: [10.3969/j.issn.1671-7856.2018.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7856.2018.03.003).
- [7] 张应龙, 左汶奇. 模拟手机电磁辐射系统对SD大鼠耳蜗边缘细胞影响的研究[J]. 检验医学与临床, 2018, 15(5): 589-591, 595. doi: [10.3969/j.issn.1672-9455.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9455.2018.05.005).
- ZHANG Yinglong and ZUO Wenqi. The effects of mobile phone electromagnetic radiation system on cochlea marginal cells of the SD rats[J]. *Laboratory Medicine and Clinic*, 2018, 15(5): 589-591, 595. doi: [10.3969/j.issn.1672-9455.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9455.2018.05.005).
- [8] 赵龙, 温舒桦, 胡玉生. TEM小室结构设计的关键技术[J]. 安全与电磁兼容, 2015(2): 77-80. doi: [10.3969/j.issn.1005-9776.2015.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9776.2015.02.016).
- ZHAO Long, WEN Shuhua, and HU Yusheng. Key technology on structure design of TEM cell[J]. *Safety & EMC*, 2015(2): 77-80. doi: [10.3969/j.issn.1005-9776.2015.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9776.2015.02.016).
- [9] NITTBY H, BRUN A, STRÖMBLAD S, *et al.* Nonthermal GSM RF and ELF EMF effects upon rat BBB permeability[J]. *The Environmentalist*, 2011, 31(2): 140-148. doi: [10.1007/s10669-011-9307-z](https://doi.org/10.1007/s10669-011-9307-z).
- [10] WASOONTARAJAROEN S, THANSANDOTE A, GAJDA G B, *et al.* Dosimetry evaluation of a cylindrical waveguide chamber for unrestrained small rodents at 1.9 GHz[J]. *Bioelectromagnetics*, 2012, 33(7): 575-584. doi: [10.1002/bem.21714](https://doi.org/10.1002/bem.21714).
- [11] 杨思凡, 庞小峰, 李斌. 生物电磁辐射实验装置的设计[J]. 生命科学仪器, 2011, 9(3): 51-53. doi: [10.3969/j.issn.1671-7929.2011.03.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7929.2011.03.023).
- YANG Sifan, PANG Xiaofeng, and LI Bin. Design of biological electromagnetic radiation devices for biological effects experiment[J]. *Life Science Instruments*, 2011, 9(3): 51-53. doi: [10.3969/j.issn.1671-7929.2011.03.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7929.2011.03.023).
- [12] 刘晓龙. 宽频电磁辐射腔及内置电磁场探头天线的设计[D]. [硕士论文], 大连海事大学, 2014.
- LIU Xiaolong. Design of broadband electromagnetic radiation cavity and built-in electromagnetic field probe antenna[D]. [Master dissertation], Dalian Maritime University, 2014.
- [13] 周峰, 王景伟, 熊宇飞, 等. IEEE STD1309—2013电场校准标准的公式与计算讨论[J]. 计量学报, 2017, 38(6): 763-764. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2017.06.23](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2017.06.23).
- ZHOU Feng, WANG Jingwei, XIONG Yufei, *et al.* Discussion on the equations and calculations in the E-field calibration standard of IEEE STD 1309-2013[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(6): 763-764. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2017.06.23](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2017.06.23).
- [14] 陈军, 万发雨, 范盼. 新型宽带横电磁波小室的设计[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(7): 938-942.
- CHEN Jun, WAN Fayu, and FAN Pan. Design of novel broadband TEM cell[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2016, 39(7): 938-942.
- [15] LIU Xingxun, ZHANG Tao, and QI Wangquan. Propagation of electromagnetic wave in coaxial conical transverse electromagnetic wave cell[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(6): 1222-1228. doi: [10.3901/CJME.2015.0410.040](https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0410.040).
- [16] 刘星汛, 张涛. 锥形同轴线阻抗渐变对S参数的影响研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(3): 1-4. doi: [10.3969/j.issn.1000-7202.2015.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7202.2015.03.001).
- LIU Xingxun and ZHANG Tao. Impact study on S parameters of conical coaxial line using impedance gradient matching section[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015, 35(3): 1-4. doi: [10.3969/j.issn.1000-7202.2015.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7202.2015.03.001).
- [17] DI BIASIO A and CAMETTI C. Polarizability of spherical biological cells in the presence of localized surface charge distributions at the membrane interfaces[J]. *Physical Review E*, 2010, 82(2): 021917. doi: [10.1103/PhysRevE.82.021917](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.021917).
- [18] PAFFI A, APOLLONIO F, LOVISOLO G A, *et al.* Considerations for developing an RF exposure system: A review for in vitro biological experiments[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(10): 2702-2714. doi: [10.1109/TMTT.2010.2065351](https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2065351).
- [19] 黄乘顺, 李星亮. 传输线阻抗匹配的分析与设计[J].

- 科学技术与工程, 2007, 7(4): 608-611. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2007.04.047](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2007.04.047).
- HUANG Chengshun and LI Xingliang. Analysis and design of impedance matching on transmission line[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(4): 608-611. doi: [10.3969/j.issn.1671-1815.2007.04.047](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2007.04.047).
- [20] 王楠, 苏涛, 梁昌洪. 微波传输线方程的分析[J]. 电气电子教学学报, 2014, 36(3): 12-13, 25. doi: [10.3969/j.issn.1008-0686.2014.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0686.2014.03.003).
- WANG Nan, SU Tao, and LIANG Changhong. Analysis on microwave transmission line equation[J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2014, 36(3): 12-13, 25. doi: [10.3969/j.issn.1008-0686.2014.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0686.2014.03.003).
- [21] 郑兆翁. 同轴式TEM模通用无源器件[M]. 北京, 人民邮电出版社, 1983: 38-49.
- ZHENG Zhaoweng. Coaxial TEM Mode General Passive Device[M]. Beijing: Post & Telecommunications Press, 1983: 38-49.
- 王诗棋: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为电磁场与微波技术、生物电磁学.
- 房少军: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波技术与微波通信.
- 陈 鹏: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为电磁场与微波技术、生物电磁学、无线传感器网络、超宽带无线通信技术与天线.